水稻精準農業(耕)體系之研究 93
第八章　遙測科技在精準農業之應用—土壤與作物空間變異之檢測
93 -103, 2000

第八章　遙測科技在精準農業之應用－土壤與作物空間變異之檢測

申　雍
國立中興大學土壤環境科學系

摘要 ---------- 94
壹、前言 ---------- 94
貳、土壤和植被的反射光譜 ---------- 95
參、土壤和作物生產的空間變異與檢測技術 ---------- 96
肆、精準農業中遙感探測的重要發展方向 ---------- 97
伍、結語 ---------- 98
陸、引用文獻 ---------- 98
英文摘要(ABSTRACT) ---------- 103

第八章　遙測科技在精準農業之應用－土壤與作物空間變異之檢測

申　雍

國立中興大學土壤環境科學系

摘　要

由於土壤性質、肥料施用、與作物吸收上自然存在之變異，導致田間作物生長具有空間分佈不均的現象。「遙測」可以精確和快速的對大面積的田區進行頻繁的觀測，提供田間作物動態生育情形的空間分佈資料。本文中回顧了葉片、土壤、和植被的光譜特性與影響因子，以及有關檢測土壤性質和作物生長性狀與產量的遙測方法。目前的遙測技術雖可達到提供「精準農業」相關資訊的最低要求，但仍有許多關於土壤和作物的基本遙測資料需要累積，新的偵檢技術需要發展，影像資料的正確性和處理的時效性也需提高，才能適當滿足「精準農業」中對遙測技術的要求。

關鍵詞：精準農業、空間變異、感測器、遙測。

壹、前　言

「精準農業」(precision agriculture，or site-specific farming)是現代化農業科技的重要發展方向之一，因此受到農業界高度的重視。「精準農業」目前尚屬於發展初期，許多技術細節仍有待進一步之開發，但是其發展的大方向已很清楚，主要要求能精確掌握氣候和土壤之時間與空間的變異，以及其對農作物生育的影響，使能經由肥培、施藥等栽培管理手段，進行高效率的農業經營與管理，並減少由農業所產生之非點源污染(non-point pollution)，進而達到提高生產利潤，保護生態環境的目標，使農業得以永續發展(Blackmore *et al.*, 1995; Castelnuovo, 1995; Pierce and Sadler, 1997)。

「遙感探測」即是利用非直接接觸的方法進行地物性狀的測定，以瞭解地物的特性並進行空間分佈之區劃。目前對於土壤和作物所進行的遙感探測，主要是測定並分析由土表和作物植冠反射或輻射的電磁波波譜，可概分為可見光(visible，400-700 nm)、近紅外光(near-infrared，700-1300 nm)、中紅外光(middle-infrared，1300-2500 nm)、遠紅外光(far-infrared，8-14μm)、微波(microwave，1mm-1m)等幾個主要波段，其中以應用可見光、近紅外光、和遠紅外光等光區的技術目前較為常見，但有關微波的應用技術正蓬勃發展中(Steven and Clark, 1990; Johannsen *et al.*,

1999)。若依進行遙測時所使用之感測器與載台區分，其技術範圍可含括由昂貴複雜的衛星遙測、航測、以至於便宜簡單的人員觀測(Barrett and Curtis, 1992; Lillesand and Kiefer, 1994)。

由於作物的生長受環境影響呈現動態的變化，「遙測技術」在「精準農業」中之角色正如同人類的雙眼一般，但能更為「精確」和「快速」的對大面積的田區進行頻繁的觀測，判斷田間作物生育情形和產量的空間分佈。田間的栽培管理者，則可利用由遙測所得的資訊，以可變率(variable rate)農機進行局地(local)肥培、施藥、灌溉、…等管理措施的操作。以下將先說明土壤和植被反射光譜的特性，再論及田間土壤和作物生產的空間變異與相關的檢測技術，最後將指出精準農業體系中遙感探測部分的重要發展方向。

貳、土壤和植被的反射光譜

土壤和植被對太陽輻射之反射光譜已被廣泛用進行有關土壤特性、作物生育情形、逆境種類與程度等空間分佈之遙測調查中。由於葉片中色素之吸收，葉片在可見光區(400-700nm)的吸收率約達 80%以上，反射率和穿透率僅約 10%左右(Guyot, 1990)。由於葉綠素 a、b 是葉片中主要的色素，其吸收峰主要位於藍光與紅光端，因此葉片在 550nm 附近有較強的反射值。由於葉片色素與細胞壁在近紅外光區(700-1300nm)近乎透明，因此葉片的反射光譜在此波段呈現一個高台(plateau)，其反射率的高低與葉肉細胞的層次、大小、排列方式，以及細胞的內容物有密切的關係。在中紅外光區(1300-2500nm)，葉片的反射光譜主要受葉片中水分含量的影響，在 1450、1950、和 2500nm 處，葉片中的水分會產生很強的吸收，因而導致反射光譜出現兩個高峰。因此葉片的反射光譜將受葉片之解剖結構、生育階段、土壤水分和養分之供應、病蟲害、…等多種因素的影響。例如，受葉片細胞的排列結構的影響，闊葉樹葉片在近紅外波段的反射值高於針葉樹葉片(Kalensky and Wilson, 1975)；雙子葉植物葉片的反射光譜高於單子葉植物(Sinclair *et al.* 1971)。當葉片老化時，由於葉綠素的崩解，可見光區的黃綠波段和紅光段的反射值將增加，近紅外光區的反射值將隨細胞間隙增加而提高，中紅外光區的反射值亦隨葉片中水分減少而提高(Guyot, 1990)。當乾旱時，葉片之反射光譜因細胞膨壓降低而有全域提高的現象(Thomas *et al.*, 1971)。當氮缺乏時，葉片在可見光區的反射值會因葉綠素濃度降低而增加，但是在近紅外光區的反射值將因細胞層數之減少而降低(Thomas and Oerther, 1972; Blackmer *et al.*, 1996)。Fe、S、Mg、Mn 等微量元素缺乏，葉片反射光譜將會產生明顯之紅位移現象(Masoni, 1996) 。病蟲害則可能因導致葉片黃化、產生壞疽、或產生新色素等方式改變葉片的反射光譜(Guyot, 1990)。植被的反射光譜除受葉片反射光譜的影響外，尚與植叢的型態與結構(Kimes, 1984; Verhoef, 1984; Jackson and Pinter, 1986; Goel, 1988)、背景土壤之反射光譜和植被的覆蓋率(Huete, 1987; Maas, 1998)、太陽入射角度和天氣狀態(Huete, 1988)等因素有關。

土壤反射光譜之反射值大致由可見光區逐漸上升至中紅外光區，在中紅外光區也因水分之吸收呈現兩個反射高峰，在任一波長的反射值則依土壤水分含量之增加而降低(Guyot, 1990)。此外，土壤的反射光譜也受土壤礦物組成和有機物含量(Condit, 1970;Coleman and Montgomery, 1987)，但是當土壤中有機物含量高於 2%以上時，土壤在可見光和近紅外光區的反射值會顯著的降低，掩蓋了土壤中礦物的反射光譜特徵(Bowers and Hank, 1965)。土表鹽分含量提高會提高土表反射光譜有全域提高的現象(Satten White and Pooder

Henley, 1987)。耕犁產生的土塊造成土表粗造度的增加，則會導致土表反射光譜全域因內部反射效應而降低(Huete *et al.*, 1985)。由於土壤並非理想的散射面，因此處於不同坡度和坡向相同土壤的反射光譜，會因太陽高度角和方位角的變換而改變(Eaton and Dirmhirn, 1979; Cierniewski, 1987)。

因此，若擬利用遙測進行有關田間作物之生育情形、逆境種類與程度等空間分佈資訊的調查，以進行符合「精準農業」之栽培管理操作，必須對前述論及之各類因子有整合性的瞭解，方能獲得正確之資訊。

參、土壤和作物生產的空間變異與檢測技術

由於「精準農業」必須藉由田間之栽培管理操作予以落實，所以遙測技術必須能精確提供有關田區中土壤性質和作物生育情形的空間分佈資訊。已有相當多的研究指出，田間土壤性質和肥培管理的技術會對作物之生產與產量造成明顯之空間變異，其變異的空間尺度通常需以 m 或 10m 為尺度單位進行評估 (Wollenhaupt et al., 1997: Pan *et al.*, 1997)。例如，Dobermann *et al.* (1995)在 IRRI 研究農場中進行的水稻生育性狀與產量空間分佈調查指出，在面積為 0.2ha 的田中，若完全不施用肥料僅利用土壤的自然肥力，則穀粒產量的變異範圍由 2.41-5.88 t ha^{-1}；若正常施用肥料，則穀粒產量的變異範圍由 4.54-8.82 t ha^{-1}，顯示田間水稻的生長具有明顯的空間變異，而空間分析指出產量的關聯性主要集中於<3m 的短距離內。對土壤中 CEC、OC、EC、P、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Zn、B、Mn、Na 等多項化學性質之空間分佈分析指出，田間自然土壤肥力呈現分佈不均的狀況，而各性質的空間關聯性多集中在<10m 的範圍內(Dobermann *et al.*, 1997)。由於土壤中可利用養分和養分吸收速率的不均一，導致田間水稻生長在幼穗形成期前即可產生明顯之空間變異，而肥料施用與吸收的不均將更增加空間的變異(Dobermann *et al.*, 1994)。

由以上論述可知，「精準農業」中的遙測技術應設法提供精確至<10m 尺度的空間分佈資料，再利用 GIS 將遙測調查所得的空間分佈資訊，套疊現有田區的分佈界限，即可藉由可變率農機以落實田間之栽培管理操作。雖然目前 SPOT 或 Landsat 等資源衛星的多光譜影像的空間解析度並無法滿足此需求，但是新一代資源衛星的空間解析度將可達到<5m 的程度(Johannsen et al., 1999)，而目前航測的空間解析度早可達到之<5m 的程度(Barrett and Curtis, 1992; Lillesand and Kiefer, 1994)，因此在未來有關「精準農業」的發展應用中，有關影像資料的空間解析度將不會成為主要的限制因素。但是，如何由影像資料中擷取所需的資訊，以及發展更適當的感測技術將成為「精準農業」能否成功推動的關鍵。以下將論及目前應用遙感檢測技術分析土壤性質和作物生長與產量的發展。

在土壤性質方面，利用在可見光區至近紅外光區反射光譜的特徵值可用於判釋土表的有機物含量與水分含量(Krishnan *et al.*, 1980; Christensen and Hummel, 1985; Kano *et al.*, 1985; Dalal and Henry, 1986; Henderson *et al.*, 1989; Henderson *et al.*, 1992; Sudduth and Hummel, 1993);利用彩色紅外線相片可用於判釋田間土壤入滲速率與微地形起伏的空間分佈(Lillesand and Kiefer, 1994)；由熱紅外線影像可用於判釋田間土壤質地與水分供應能力之空間分佈(Lillesand and Kiefer, 1994)；應用微波亦可判釋土表水分含量 (Ulaby *et al.*, 1974; Bernard *et al.*, 1982; Ulaby *et al.*, 1983)、土表粗造度(Ulaby *et al.*, 1978; Choudhury et al., 1979)、土壤質地(Ulaby *et al.*, 1978)等

重要性質的空間分佈。

在作物生長與產量方面，在可見光區和近紅外光區的反射光譜可被用於作物地表覆蓋率(Huete, 1987; Maas, 1998)、LAI(Pollock and Kanemasu, 1979; Gardner and Blad, 1986; Peterson *et al.*, 1987)、葉綠素含量(Thomas and Gausman, 1977; Ercoli *et al.*, 1993)、植株營養狀況(Al-Abbas *et al.*, 1974; Milton *et al.*, 1989; Milton *et al.*, 1991; Adams *et al.*, 1993; Blackmer *et al.*, 1996)、乾旱逆境(申和李，1998)、作物產量(Kanemasu *et al*, 1990; Thenkabail *et al.*, 1994)之估測；在中紅外光區的反射光譜可被用於葉片水分含量測定(Inoue *et al.*, 1993);由熱紅外線影像可用於區別受到水分逆境傷害的區域(Jackson, 1982; Inoue, 1990);微波則可用於估測 LAI(Ulaby *et al.*, 1984; Prevot *et al.*, 1993)。

Long *et al.* (1995)指出，利用彩色紅外線相片區分之作物生產空間分佈圖的準確度，較利用多種土壤性質組合所得的作物生產空間分佈圖爲高。由於田間作物生育性狀和產量是許多栽培環境與管理技術綜合的表現，因此在「精準農業」的操作實務上，應先利用遙測技術先探求作物生育性狀的空間分佈，再細究導致產生空間分佈變異的原因，然後才利用可變率農機以落實田間之栽培管理操作。

目前資源衛星所能提供的波譜解析度應可以滿足有關作物 LAI、產量等空間分佈調查的需求，若要進一步由影像資料細究造成空間變異的原因則非常困難(Moran *et al.*, 1997)，但是新一代資源衛星的波譜解析度將可達到<10nm 的程度(Johannsen *et al.*, 1999)。在衛星之光譜解吸力尙未提昇前，可採用航測方式提供光譜解析度高的影像，目前國內農航所的航測相機可提供 13 個波段的影像資料，其中 10 個分佈在 0.38-1.1μm 間，另有 UV(0.31-0.38μm)、InSb(4.5-5.5μm)、及 MCT(8-14μm)偵測器各一組，影像之空間解析度和光譜解析度均較 SPOT、LandSat 爲佳；光譜解析度<20nm 的航測相機也已商品化(Lewotsky, 1994; ESSI, 2000; Bianchi *et al.*, 2000)。

肆、精準農業中遙感探測的重要發展方向

爲使「精準農業」科技未來能落實於農業的生產中，有關「遙測技術」的部分應朝以下三個重要方向發展。

(一)作物與土壤特徵光譜資料庫之建立：收集主要農作物在正常生長狀態下，以及當處於水分缺乏、養份缺乏、病蟲害、…等各類逆境下的植被反射光譜資料，以及主要農耕土壤受有機物含量、土壤水分含量、鹽分含量、…等重要因子影響時的反射光譜資料。並需對資料庫中儲存的光譜資料，利用各種分析技巧進行特徵值的研究，不僅需達到可由遙測影像資料判釋田間作物生育狀況和產量的空間分佈，還需能判釋作物在田間遭受的逆境種類與程度(Steven *et al.*, 1990; Moran *et al.*, 1997; Johannsen *et al.*, 1999)。

(二)偵檢技術之發展：由第(一)部分研究中所得出的最佳判釋方法，所需遙測資料極有可能是目前常用之遙測載台與感測器所無法提供者，因此需依據第(一)部分研發的成果，設法取得和發展更適合精準農業使用的感測器與載台。此外，應用微波(Holmes, 1990; Luzi *et al.*, 1990; Paris, 1990; Moran *et al.*, 1999)、雷射(Lichtenthaler, 1990)、電磁感應(Jaynes *et al.*, 1995; Sudduth *et al.*, 1997;)、…等新技術偵檢作物逆境與土壤性質的研究也應加強，以克服現有偵檢技術之限制。

(三)影像資料正確性與傳遞時效之提昇：利用衛星或飛機可快速進行大範圍作物生長情形空間分佈之調查，是「精準農業」中各種探測地面作物生長狀況之感應器的主要載台，因此必須探討對衛星與航

照影像進行幾何糾正與大氣輻射校正的處理技術，提供正確的地面影像資料，以依據由前述二部分研究發展出的判釋方法進行影像資料的判讀和分類。此外，由於影響田間作物生產的關鍵期爲時甚短，因此如何提高從影像拍攝、處理、判讀、以至分送等過程時效性的研究亦是非常重要的(Frazier *et al*., 1997)。

伍、結 語

「遙測」在「精準農業」中之角色正如同人類的雙眼一般，但能更爲「精確」和「快速」的對大面積的田區進行頻繁的觀測，提供田間作物動態生育情形的空間分佈資料。目前的遙測技術雖可達到「精準農業」中最低的要求，但仍有許多的基本資料需要累積，新的偵檢技術需要發展，影像資料的正確性和處理的時效性也需提高。

「遙測」雖然是「精準農業」中的雙眼，但是縝密詳實的遙測資訊並不能單獨達成「精準農業」的目標，如何利用遙測所獲得的資訊，將正確的肥料與農藥，適時適量的施用到正確的地點，以達到應用「精準農業」提高生產利潤，保護生態環境，使農業得以永續發展的目標，則還需依靠作物、土壤、病蟲害、農機等多方面專家的共同合作與努力。

陸、引用文獻

1. 申雍、李佩玲。1998。應用 SPOT 衛星影像區分水稻旱害等級與受災範圍支出步研究。中華農業氣象 5:203-208.
2. Adams, M.L., W.A. Norvell, J. H. Peverly and W.D. Philpot. 1993. Fluorescence and reflectance characteristics of manganese deficient soybean leaves: Effect of leaf age and choice of leaflet. Plant and Soil 155/156: 235-238.
3. Al-Abbas, A.H., R. Barr, J.D. Hall, F.L. Crane and M.F. Baumgardner. 1974. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. Agron. J. 66: 16-20.
4. Barrett, E.C. and L.F. Curtis. 1992. "Introduction to Environmental Remote Sensing". 3rd ed. Chapman & Hall.
5. Bernard, R., P. Martin, J.L. Thony, M. Vauclin and D. Vidal-Madjar. 1982. A C-band radar calibration for determining soil moisture. Remote Sens. Environ. 12: 189-200.
6. Bianchi, R., R.M. Cavalli, C.M. Marino and S. Pignatti. 2000. MIVIS airborne hyperspectral remote sensing in Europe. http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/ISSSR-95/mivisair.html
7. Blackmore, B.S., P.N. Wheeler, J. Moris, R.M. Moris and R.J.A. Jones. 1995. The role of precision farming in sustainable agriculture: A European perspective. In: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). p.777-793. ASA, CSSA, SSSA.
8. Blackmer, T.M., J.S. Schepers, G.E. Varvel and E.A. Walter-Shea. 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. Agron. J. 88: 1-5.
9. Bowers, S.S. and R.J. Hanks. 1965. Reflection of radiant energy from soil. Soil Sci. 100:130-138.
10. Castelnuovo, R. 1995. Environmental concerns driving site-specific management in agriculture. In: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). p.867-880. ASA, CSSA, SSSA.
11. Christensen, D.A. and J. W. Hummel.

1985. A real-time soil moisture content sensor. ASAE Paper 85-1589.. ASAE.
12. Choudhury, B.J., T.J. Schmugge, R.W. Newton and A. Chang. 1979. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. J. Geophy. Res. 84: 5699-5706.
13. Cierniewski, J. 1987. A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near-infrared range. Remote Sens. Environ. 23: 97-115.
14. Coleman, T.L. and O.L. Montgomery. 1987. Soil moisture, organic mater and iron content effect on the spectral characteristics of selected vertisols and alfisols in Alabama. Photo. Eng. and Remote Sens. 53: 1659-1662.
15. Condit, H.R. 1970. The spectral reflectance of American soils. Photo. Eng. 36: 955-966.
16. Dalal, R.C. and R.J. Henry. 1986. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 120-123.
17. Eaton, F.D. and I. Dirmhirn. 1979. Reflected irradiance indicatrices of natural surfaces and their effect on albedo. Appl. Opt. 18: 994-1008.
18. Ercoli, L., M. Mariotti, A. Masoni and F. Massantini. 1993. Relationship between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in corn leaves. Eur. J. Agron. 2: 113-117.
19. ESSI. 2000. The eye on earth's resources. http://www.earthsearch.com/probe1.html.
20. Frazier, B.E., C.S. Walters and E.M. Perry. 1997. Role of remote sensing in site-specific management. In: "The State of Site Specific Management for Agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). p. 149-160. ASA, CSSA, SSSA.
21. Gardner, B.R. and B.L. Blad. 1986. Evaluation of spectral reflectance models to estimate corn leaf area while minimizing the influence of soil background effect. Remote Sens. Environ. 20: 183-193.
22. Goel, N.S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. Remote Sens. Rev. 4: 1-222.
23. Guyot, G. 1990. Optical properties of vegetation canopies. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 19-43. Butterworths.
24. Henderson, T.L., A. Szilagyi, M.F. Baumgardner, C.C.T. Chen and D.L. Landgrebe. 1989. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 1778-1784.
25. Henderson, T.L., M.F. Baumgardner, D.P. Franzmeier, D.E. Stott and D.C. Coster. 1992. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 865-872.
26. Holmes, M.G. 1990. Application of radar in agriculture. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p.307-330. Butterworths.
27. Huete, A.R., B.D. Jackson and D.F. Post. 1985. Spectral response of plant canopies with different soil background. Remote Sens. Environ. 17: 37-53.
28. Huete, A.R. 1987. Soil dependent

spectral response in a developing plant canopy. Agron. J. 79: 61-68.

29. Huete, A.R. 1988. Soil and atmosphere influence on the spectra of partial canopies. Remote Sens. Environ. 25: 89-106.
30. Inoue, Y. 1990. Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. Jpn. J. Crop Sci. 59: 762-768.
31. Inoue, Y., S. Morinaga and M. Shibayama. 1993. Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. Jap. J. Crop Sci. 62: 462-469.
32. Jackson, R.D. and P.J. Pinter, Jr. 1986. Spectral response of architecturally different wheat canopies. Remote Sens. Environ. 20: 43-56.
33. Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. Adv. Irrig. 1: 43-85.
34. Jaynes, D.B., T.S. Colvin and J. Ambuel. 1995. Yield mapping by electromagnetic induction. In: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). p. 383-394. ASA, CSSA, SSSA.
35. Johannsen, C.J., P.G. Carter, P.R. Willis, E. Owubah, B. Erickson, K. Ross and N. Targulian. 1999. Applying remote sensing technology to precision farming. In: "Precision Agriculture". Proc. 4th Int. Conf. p. 1413-1422. ASA, CSSA, SSSA.
36. Kalensky, Z. and D.A. Wilson. 1975. Spectral signature of forest trees. Proc. 3rd. Can. Symp. Remote Sens. p.155-171.
37. Kanemasu, E.T., T.H. Demetriades-Shah, H. Su and A.R.G. Lang. 1990. Estimating grassland biomass using remotely sensed data. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 185-199. Butterworths.
38. Kano, Y., W.E. McClure and R.W. Skaggs. 1985. A near infrared reflectance soil moisture meter. Trans. ASAE 28: 1852-1855.
39. Kimes, D.S. 1984. Modeling the directional reflectance from complete homogeneous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. J. Opt. Soc. Am. 1: 575-588.
40. Krishnan, P., J.D. Alexander, B.J. Butler and J.W. Hummel. 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. Soil Sc. Soc. Am. J. 44: 1282-1285.
41. Lewotsky, K. 1994. Hyperspectral imaging: Evolution of imaging spectrometry. http://www.geo.unizh.ch/~schaep/research/aviris/is.html
42. Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 1994. "Remote Sensing and Image Interpretation". 3rd ed. John Wiley & Sons.
43. Lichtenthaler, H.K. 1990. Applications of chlorophyll fluorescence in stress physiology and remote sensing. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 287-305. Butterworths.
44. Long, D.S., G.R. Carlson and S.D. DeGloria. 1995. Quality of field management maps. In: "Site-Specific Management for Agricultural Systems". Robert, P.C., R.H. Rust and W.E. Larson (eds.). p.251-271. ASA, CSSA, SSSA.
45. Luzi, G., S. Paloscia and P. Pampaloni. 1990. Microwave radiometry for monitoring agricultural crops. In: "Applications of Remote Sensing in

Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 331-353. Butterworths.

46. Maas, S.J. 1998. Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed scene reflectance. Agron. J. 90: 384-388.
47. Masoni, A., L. Ercoli and M. Mariotti. 1996. Spectral properties of leaves deficient in iron, sulfur, magnesium, and manganese. Agron. J. 88: 937-943.
48. Milton, N.M., C.M. Ager, B.A. Eiswerth and M.S. Power. 1989. Arsenic- and selenium-induced changes in spectral reflectance and morphology of soybean plants. Remote Sens. Environ. 30: 263-269.
49. Milton, N.M., B.A. Eiswerth and C.M. Ager. 1991. Effect of phosphorus deficiency on spectral reflectance and morphology of soybean plants. Remote Sens. Environ. 36: 121-127.
50. Moran, M.S., Y. Inoue and E.M. Barnes. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sens. Environ. 61: 319-345.
51. Moran, M.S., D.C. Hymer, J. Qi and Y. Kerr. 1999. Radar imagery for precision crop and soil management. In: "Precision Agriculture". Proc. 4th Int. Conf. p. 1423-1434. ASA, CSSA, SSSA.
52. Pan, W.L., D.R. Huggins, G.L. Malzer, C.L. Douglas, Jr. and J.L. Smith. 1997. Field heterogeneity in soil-plant nitrogen relations: Implications for site-specific management. In: "The State of Site Specific Management for Agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). p. 81-99. ASA, CSSA, SSSA.
53. Paris, J.F. 1990. On the uses of combined optical and active-microwave image data for agricultural applications. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 355-374. Butterworths.
54. Peterson, D.L., M.A. Spanner, S.W. Running and K.B. Teuber. 1987. Relationships of thematic mapper simulation data to leaf area index of temperate coniferous forests. Remote Sens. Environ. 22: 323-341.
55. Pierce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). 1997. "The State of Site Specific Management for Agriculture". ASA, CSSA, SSSA.
56. Pollock, R.B. and E.T. Kanemasu. 1979. Estimating leaf area index of wheat with Landsat data. Remote Sens. Environ. 8: 307-312.
57. Prevot, L., I. Champion and G. Guyot. 1993. Estimating surface soil moisture and leaf area index of a wheat canopy using dual-frequency (C and X bands) scatterometer. Remote Sens. Environ. 46: 331-339.
58. Satten White, M.B. and J. Ponder Henley. 1987. Spectral characteristics of selected soils and vegetations in Northern Nevada and their discrimination using band ratio techniques. Int. J. Remote Sens. 23: 155-175.
59. Sinclair, T.R., R.M. Hoffer and M.M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agron. J. 63: 864-868.
60. Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) 1990. "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Butterworths.
61. Steven, M.D., T.J. Malthus, T.H. Demetriades-Shah, F.M. Danson and

J.A. Clark. 1990. High-spectral resolution indices for crop stress. In: "Applications of Remote Sensing in Agriculture". Steven, M.D. and J.A. Clark. (eds.) p. 209-227. Butterworths.

62. Sudduth, K. A. and J. W. Hummel. 1993. Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer. Trans. ASAE 36: 1571-1582.
63. Sudduth, K.A., J.W. Hummel and S.J. Birrell. 1997. Sensors for site-specific management. In: "The State of Site Specific Management for Agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). p. 183-210. ASA, CSSA, SSSA.
64. Thenkabail, P.S., A.D. Ward and J.G. Lyon. 1994. Impacts of agricultural management practices on soybean and corn crops evident in ground-truth data and thematic mapper vegetation indices. Trans. ASAE 37: 989-995.
65. Thomas, J.R., L.N. Namken, G.F. Oerther and R.G. Brown. 1971. Estimating leaf water content by reflectance measurements. Agron. J. 63: 845-847.
66. Thomas, J.R. and G.F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. Agron. J. 64: 11-13.
67. Thomas, J.R. and H.W. Gausman. 1977. Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. Agron. J. 69: 799-802.
68. Ulaby, F.T., J. Cihlar and R.K. Moore. 1974. Active microwave measurements of soil water content. Remote Sens. Environ. 3: 185-203.
69. Ulaby, F.T., M.C. Dobson and D.C. Brunfeldt. 1983. Improvement on soil moisture estimation accuracy of vegetation-covered soil by combined active/passive remote sensing. IEEE Trans. GeoSci. Remote Sens. GE-21: 300-307.
70. Ulaby, F.T., P.P. Batlivala and M.C Dobson. 1978. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I – Bare soil. IEEE Trans. GeoSci. Electronics GE-16: 286-295.
71. Ulaby, F.T., C.T. Allen, G. EgerIII and E.T. Kanemasu. 1984. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. Remote. Sens. Environ. 14: 113-133.
72. Verholf, W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. Remote Sens. Environ. 16: 125-141.
73. Wollenhaupt, N.C., D.J. Mulla and C.A. Gotway Crawford. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. In: "The State of Site Specific Management for Agriculture". Pierce, F.J. and E.J. Sadler (eds.). p. 19-53. ASA, CSSA, SSSA.

Chapter 8 Application of Remote Sensing in Precision Agriculture: Detection of Spatial Variability of Soils and Crops

Yuan Shen

Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402, ROC

ABSTRACT

The spatial heterogeneity of soil properties and variations due to fertilizer application and nutrient uptake by roots result in spatial variation of crop growth and productivity in field. Remote sensing can provide accurate, prompt, and frequent survey for large area. Accordingly, maps regarding spatial distribution of dynamic crop growth in the field can thus be provided. In this review, spectrum characteristics of leaf, soil and canopy and factors affect those characteristic are introduced. Techniques to detect spatial variation of soil properties and crop growth and productivity are also discussed. It is concluded that the present remote sensing techniques can barely satisfy the requirement of precision agriculture. In order to satisfy the requirement, basic spectrum information regarding soils and crops need to be accumulated, new detection techniques need to be developed, and the accuracy and processing time of acquired images also need to be improved.

Keywords: Precision agriculture, Spatial variability, Sensors, Remote sensing.